

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕДНЫХ ГАЗОВ В ПГУ С ВЦГ

Левин В.И., Федорова Ю.С.

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

В докладе рассмотрен способ сжигания бедного синтез-газа с пониженной температурой горения в высоконагретом цикловом воздухе, обеспечивающий подавление оксидов азота при росте эффективности комбинированного цикла с повышением температуры перед ГТУ до 1500–1700 °С. Представлены новые решения в сочетании с известными методами, которые создают реальную основу энергетического использования бедных газов различной природы с отказом от специальных устройств стабилизации пламени (форкамер), кинетических схем горения и с обеспечением экологичности сжигания. Эффективным способом снижения ограничений по количеству воздуха на охлаждение жаровой трубы и разбавление продуктов сгорания является перераспределение тепловой нагрузки с синтез-газа на дополнительно подогреваемый воздух.

Ключевые слова: бедный синтез-газ, ПГУ, ГТУ, внутрицикловая газификация (ВЦГ), оксиды азота.

The way of burning low-calorific syntheses gas with the low burning temperature in high-heated cyclic air providing suppression of nitrogen oxides with a growth of efficiency of the combined cycle with temperature increase before gas turbine to 1500–1700 °C was considered in this report. New solutions and known methods of combination are create a real basis for using of low-calorific gases without special devices of stabilization of a flame, kinetic schemes of burning and with ensuring environmental friendliness of burning. The effective way of decrease in restrictions by amount of air on cooling of a spherical pipe and dilution of products of combustion is redistribution of thermal load about syntheses gas of in addition warmed up air.

Keywords: the low-calorific syntheses gas, steam turbine, gas turbine, gasification in a cycle, nitrogen oxides.

Одни из наиболее перспективных способов увеличения КПД ПГУ с внутрицикловой газификацией (ВЦГ) – воздушная конверсия и использование горячей газоочистки, а также увеличение температуры рабочего тела перед газовой турбиной. Mitsubishi и другие ведущие производители ГТУ интенсивно разрабатывают установки и схемы, способные на повышение температуры перед ГТ до 1500–1700 °С, в т.ч. при работе на синтез-газе воздушной конверсии, осуществляемой как в независимых промышленных установках (коксо доменное и конвертерное производство), так и в системах с ВЦГ.

При повышении температуры перед ГТ происходит увеличение локальной температуры горения и выхода термических NO_x . По тем же причинам использование горячей газоочистки способствует росту выхода топливных NO_x . Также при работе на высоких температурах появляется такая трудность как недостаток воздуха на охлаждение жаровой трубы и разбавление продуктов сгорания при повышении температуры газов перед ГТ. По данным японских исследователей, такое ограничение при работе на синтез-газе возникает при температуре выше 1500 °С.

Для устранения обозначенных выше проблем в разрабатываемых ГТУ используются различные технологические меры.

Для снижения локальной температуры горения газов с высокой теоретической температурой горения (в том числе синтез-газы на основе кислородной конверсии) известно несколько решений. Наиболее успешные из них – впрыск пара, азота, рециркуляция продуктов сгорания или организация предварительного смешения топлива и циклового воздуха. Недостаток воздуха для охлаждения предлагается компенсировать паровым охлаждением элементов ГТ.

Перечисленные мероприятия имеют ряд известных недостатков экономического и эксплуатационного характера.

Альтернативным методом может стать работа газовых турбин на изначально бедном газе с низкой теоретической температурой горения, обеспечивающей меньший выход термических NO_x . Газы с $Q_i^d = 3\text{--}7$ МДж/м³ и менее получают в процессах воздушной и паровоздушной конверсии низкосортных топлив. При использовании стандартных технологий сжигания таких газов остро встает проблема стабилизации факела. Проблема сжигания бедных искусственных газов разной природы в ГТУ и ПГУ на их основе в настоящее время находится в разработке ведущих мировых энергомашиностроительных компаний Siemens, MHI, Alstom, китайских компаний.

Усилиями ведущих разработчиков (Siemens, GE, MHI) единичная мощность установок ПГУ на искусственных газах перевалила за 400 МВт, а нижняя граница топливных газов по калорийности располагается на уровне 3–4 МДж/м³ с тенденцией к дальнейшему понижению.

Лидером внедрения таких технологий является Китай, единичные демонстрационные и коммерческие парогазовые установки с ВЦГ угля располагаются в Японии, США, странах ЕС. На Украине реализуется проект получения синтез-газа из угля. В России усилиями Технологической платформы «Экологически чистая тепловая энергетика высокой эффективности» ведутся НИОКР по созданию ПГУ с ВЦГ.

В работе рассматривается способ сжигания бедного синтез-газа с пониженной температурой горения в высоконагретом цикловом воздухе, обеспечивающий подавление оксидов азота при росте эффективности комбинированного цикла с повышением начальной температуры до 1500–1700 °С.

Применяемые в настоящее время двухступенчатые технологии для сжигания синтез-газа после горячей газоочистки с параметрами: $Q_i^d > 4,8\text{--}5$ МДж/кг, $\text{CH}_4 < 1\%$ и $\text{NH}_3 < 1000$ млн⁻¹ в КС ГТУ имеют следующие характеристики:

1. Температура газов перед газовой турбиной – t_r не более 1500 °С, по условиям теплового и массового баланса.

2. Использование пилотных горелок и форкамер для стабилизации процесса горения.

3. NO_x топливные < 60 млн⁻¹, NO_x термические < 8 млн⁻¹.

В разрабатываемом варианте появляется возможность использования в качестве топлива низкокалорийных газов с $Q_i^d = 1,5\text{--}5$ МДж/кг при сохранении остальных параметров ($\text{CH}_4 < 1\%$ и $\text{NH}_3 < 1000$ млн⁻¹), но без использования пилотного топлива, форкамер и с максимальной температурой газов перед турбиной t_r до 1700 °С.

Общее в техническом решении разработанной технологии с существующей двухступенчатой технологией сжигания синтез-газа в потоке воздуха с температурой 300–400 °С состоит в том, что

– синтез-газ поступает в камеру сгорания после сухой горячей газоочистки и вносит в нее значительное количество аммиака, сформировавшегося в газогенераторе из топливного азота;

– содержание углеводородов (СН₄) в газе низкое (около 1 %);

– двухступенчатый подвод воздуха к камере сгорания осуществляется таким образом, что в первичной зоне коэффициент избытка воздуха <1, а оставшийся воздух подается во вторичную зону.

Модернизация технологии связана с использованием высоконагретого (800–1000 °С) циклового воздуха.

Повышение уровня температуры воздуха более чем в два раза предопределяет активное реагирование горючих компонент при попадании в эту среду.

Нагрев циклового воздуха выше температуры воспламенения газов, пресекая процесс предварительного смешения газа с воздухом и препятствуя организации кинетического режима сжигания, автоматически решает проблему стабилизации диффузионного факела без его отрыва и погасания, «бедного» срыва пламени для газов с практически любой теплотой сгорания, что не требует применяемого в стандартных горелочных устройствах синтез-газа форкамерного сжигания подсветочного топлива и позволяет использовать в качестве топлива более бедные синтез-газы.

Исходные данные для моделирования одноступенчатой схемы получены двумя независимыми методами: в программном пакете «Thermoflex» и по методике [1] на условия работы в составе ПГУ 200–300 МВт.

Расхождения в расходах воздуха и топлива, полученных по результатам теплового баланса рассчитанного в соответствии с [1] и в программном пакете «Thermoflex» составляет по воздуху 2,6 %, по топливу 4,3 %. Для оценочных инженерных расчетов, целью которых является выбор технологии сжигания синтез-газа, полученной точности расчета теплового баланса достаточно. В дальнейшем в качестве исходных для моделирования используем результаты, полученные в программном пакете «Thermoflex».

Расчетные модели проектировались при значениях теплонапряженности для современных камер сгорания ГТУ, указанных в [2].

Теплонапряженность объема камеры сгорания:

$$q_{\text{кс}} V = 80\text{--}200 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{Па}).$$

Теплонапряженность сечения камеры сгорания:

$$q_{\text{кс}} V = 50\text{--}300 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{Па}).$$

Ключевыми параметрами двухступенчатой схемы являются время пребывания топлива в высокотемпературной зоне, распределение температур по объему камеры сгорания, а, следовательно, длина первичной и вторичной зон камеры сгорания, скорости потоков газа, воздуха и продуктов сгорания.

Было выполнено 15 поисковых исследований, направленных на определение характеристик камеры сгорания, приводящих к получению оптимальных целевых параметров.

Расчет проведен для схем ПГУ на перспективные и достигнутые параметры.

Основные исходные данные для моделирования камеры сгорания ПГУ на перспективные параметры:

- температура газов на выходе из камеры сгорания 1500 °С;
- температура воздуха на входе 1000 °С;
- температура синтез-газа на входе 500 °С;
- теплота сгорания синтез-газа 3632,3 кДж/кг;
- коэффициент избытка воздуха 2,4;
- состав синтез-газа (об. %): CO – 23,42; CO₂ – 5,489; CH₄ – 0,0005; H₂ – 10,67; H₂O – 8,131; N₂ – 51,66; Ar – 0,6198.

Основные исходные данные для моделирования камеры сгорания ПГУ на достигнутые параметры:

- температура газов на выходе из камеры сгорания 1150 °С;
- температура воздуха на входе 800 °С;
- температура синтез-газа на входе 500 °С;
- теплота сгорания синтез-газа 5221,9 кДж/кг;
- коэффициент избытка воздуха 4,7;
- состав синтез-газа (об. %): CO – 28,25; CO₂ – 2,194; CH₄ – 0,1135; H₂ – 17,86; H₂O – 0,02931; N₂ – 50,94; Ar – 0,6063.

Рассмотрены различные конфигурации камеры сгорания, способы подвода воздуха и топлива, углы крутки потоков. Моделировалась щелевая подача газа и первичного воздуха в торцевую часть кольцевой камеры сгорания, коллекторная подача первичного воздуха в поток синтез-газа, коллекторная подача синтез-газа в поток первичного воздуха. Подача вторичного воздуха осуществлялась во всех вариантах через наружную стенку камеры.

Перемешивание воздуха и топлива во всех рассмотренных вариантах не достаточное. При щелевой подаче синтез-газа струя топлива сохраняется до конца камеры сгорания. На всем протяжении камеры сгорания сохраняются зоны с предельной температурой около 2000 °С, которые являются источником повышенного образования NO_x. Особенно большое количество NO_x при щелевой подаче синтез-газа образуется в области по длине камеры сгорания 0,3–1 м. Это можно объяснить плохим перемешиванием и наличием высокотемпературной зоны. Разность температур в выходном сечении составляет более 300 °С. На поле температур в выходном сечении камеры сгорания при щелевой подаче наблюдается четко выраженная полоса высокотемпературной зоны.

Предложенное решение в сочетании с известными методами создаст реальную основу энергетического использования бедных газов различной природы с отказом от специальных устройств стабилизации пламени (форкамер), кинетических схем горения и с обеспечением экологичности сжигания. Перераспределение тепловой нагрузки с синтез-газа на дополнительно подогреваемый воздух явится эффективным способом снижения ограничений по количеству воздуха на охлаждение жаровой трубы и разбавление продуктов сгорания. По оценкам, выполненным в рамках НИР, воздуха будет достаточно для охлаждения газов перед ГТ до температуры 1700 °С.

Осуществление высокотемпературного нагрева циклового воздуха перед подачей в камеру сгорания позволит:

– исключить явление отрыва факела и стабилизировать горение в КС без применения дополнительных устройств, типа пилотной горелки или форкамеры;

– уйти от проблемы проскока пламени ввиду отказа от предварительного смешения газа и воздуха;

– отодвинуть за ~ 1700 °С предел повышения начальной температуры традиционной системы воздушного охлаждения;

– снизить требования к калорийности топливного газа, что позволяет отказаться от подмешивания к газам типа доменного присадки богатого газа (природного, коксового), упрощает систему газоподготовки и вводит в хозяйственный оборот неиспользуемые ранее предельно бедные газы с $Q_i^d < 3$ МДж/м³.

В дальнейшем планируется продолжение работы по моделированию сжигания бедного газа в камере сгорания стандартной ГТУ для оценки применимости предложенной технологии.

Исследование было выполнено в Уральском федеральном университете при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00524).

Список использованных источников

1. *Тепловой расчет котлов (Нормативный метод).* – СПб.: НПО ЦКТИ. – 1998.
2. *Газотурбинные энергетические установки: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. «Теплоэнергетика» / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.С. Земцов, А.С. Осыка; под ред. С.В. Цанева.* – М.: МЭИ, 2011.
3. *Takeharu Hasegawa. Developments of Gas Turbine Combustors for Air-Blown and Oxygen-Blown IGCC / Advances in Gas Turbine Technology. Edited by Ernesto Benini, InTech, 2011.*